

Дисперсионный элемент устройства для сжатия лазерных импульсов на основе планарной фотонно-кристаллической структуры (варианты) .

Настоящее изобретение относится к области лазерной техники и волоконной оптики и может использоваться при создании компактных коротковолновых лазерных (от нескольких фемтосекунд до нескольких пикосекунд) систем, а в частности, создание компактных компрессоров световых импульсов на основе планарных фотонно-кристаллических структур может быть использовано для миниатюризации передовых твердотельных импульсных лазерных систем.

В настоящее время происходит процесс интенсивного исследования фотонных кристаллов, представляющих собой новый тип искусственных структурно-организованных сред с трехмерной периодичностью оптических характеристик, в которых элементарные кристаллические ячейки имеют размеры порядка оптической длины волны. Вследствие периодической модуляции их показателя преломления фотонные кристаллы в определенных интервалах длин волн и волновых векторов характеризуются особыми режимами распространения световых волн. Указанные свойства фотонных кристаллов активно исследуются в последнее время в связи с возможностью использования в различных видах приложений, включая управления спонтанным излучением, разработку полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором, создание

брэгговских отражателей и чирпированных зеркал, низкопороговых оптических переключателей и ограничителей, а также нелинейных диодов.

Известны дисперсионные элементы, основанные на фотонно-кристаллических структурах и выполненные в виде периодической структуры сформированной из периодически чередующихся слоев с различными показателями преломления («Квантовая электроника», 25, № 10, стр.885-890, 1998г., А.М.Желтиков, Н.И.Коротеев, С.А.Магницкий, А.В.Тарасишин «Компрессия световых импульсов в фотонных кристаллах»).

Авторами на примере указанного дисперсионного элемента изучена возможность управления фазой и длительностью коротких лазерных импульсов с помощью указанных дисперсионных элементов. Выполнены аналитические исследования сжатия и фазовой модуляции импульсов в одномерных структурах с фотонными запрещенными зонами. При этом авторы в статье представляют результаты исследования возможностей указанных дисперсионных элементов на основе фотонных кристаллов с кубической оптической нелинейностью, которые позволяют уменьшить длительность лазерных импульсов до длительностей, соответствующих нескольким периодам оптического поля, на характерных пространственных масштабах меньше миллиметра.

Известен дисперсионный элемент выполненный на основе многослойной периодической структуры с модуляцией показателя преломления и/или нелинейной восприимчивости (См. Письма в ЖЭТФ, том 71, вып.9, стр.539-543, 2000г., А.В. Андреев,

А.В.Балакин, Д.Буше и др. «Компрессия фемтосекундных световых импульсов в тонком одномерном фотонном кристалле»).

Использование указанного дисперсионного элемента на основе одномерного фотонного кристалла с многослойной периодической структурой с сильной модуляцией линейного показателя преломления позволяет осуществлять компрессию фемтосекундных лазерных импульсов при длине кристалла 4.8 мкм.

Указанные источники информации описывают аналоги заявленного технического решения, однако представленные в них устройства сжатия импульсов на основе дисперсионного элемента в виде фотонно-кристаллической структуры имеют ряд недостатков, а именно: сложность и высокая стоимость достаточно толстых (несколько мм) многослойных периодических структур, невозможность интеграции указанных структур в планарную интегрально-оптическую схему.

В соответствии с вышеизложенным, задачей настоящего изобретения является обеспечение дисперсионного элемента устройства для сжатия импульсов на основе планарной фотонно-кристаллической структуры с длиной геометрического пути импульса несколько миллиметров и с возможностью интеграции указанного дисперсионного элемента в планарную интегрально-оптическую схему, при этом достигается большая компрессия импульса при минимальных дифракционных потерях.

Указанный результат достигается обеспечением дисперсионного элемента устройства для сжатия лазерных импульсов, осуществляющего компрессию импульса с фазовой модуляцией

выполненного на основе планарной фотонно-кристаллической структуры в виде одномерной периодической структуры, сформированной в слое предварительно заданной толщины высокопреломляющего материала с показателем преломления  $n_2$ , который нанесен на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ ; причем периодическая структура представляет собой множество параллельных канавок с предварительно заданной шириной и глубиной, выполненных в указанном высокопреломляющем слое на равных расстояниях друг от друга, при этом направление распространения импульса в дисперсионном элементе осуществляется перпендикулярно указанным канавкам, а длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией.

При этом указанная периодическая структуры может быть покрыта защитным слоем, выполненным из материала с предварительно заданным показателем преломления  $n_3$  и обеспечивающим механическую прочность и снижение потерь на рассеяние, при этом  $n_3 < n_2$  на величину, обеспечивающую волноводное распространение импульса в одномодовом режиме.

Кроме того, длина дисперсионного элемента  $L$ , обеспечивающая максимальное сжатие импульса задается в соответствии с теорией, изложенной в (B.Saleh, M.Teich "Fundamentals of Photonics", John Wiley&Sons, Inc., 1991, Chapter 5, p.188) задается из выражения:

$$\frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k} \quad (1)$$

где  $k''$  - дисперсия групповой скорости в фотонно-кристаллической структуре,  $a_0$  - скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $T$  - длительность импульса, входящего в дисперсионный элемент.

Согласно второму варианту реализации изобретения указанный результат достигается за счет обеспечения дисперсионного элемента устройства для сжатия импульсов, осуществляющего компрессию импульса с фазовой модуляцией, выполненного на основе планарной фотонно-кристаллической структуры в виде двумерной периодической структуры с предварительно заданным периодом  $a$ , сформированной в слое предварительно заданной толщины высокопреломляющего материала с показателем преломления  $n_2$ , который нанесен на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ , причем в узлах указанной двумерной периодической структуры выполнены первые отверстия предварительно заданных равных размеров, образующие столбцы, и вторые отверстия предварительно заданных размеров, отличные от размеров указанных первых отверстий, образующие предварительно заданное количество соседних столбцов, при этом размеры указанных первых и вторых отверстий и указанные показатели преломления задаются из условия обеспечения волноводного распространения в одномодовом режиме импульса с фазовой модуляцией вдоль столбцов указанных вторых отверстий указанной структуры, причем длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией.

Кроме того, указанная двумерная периодическая структура выбирается из: тригональной, прямоугольной или квадратной периодических решеток.

При этом, указанная периодическая структура может быть покрыта защитным слоем, выполненным из материала с предварительно заданным показателем преломления  $n_3$ , и обеспечивающим механическую прочность и снижение потерь на рассеяние.

А длина дисперсионного элемента  $L$  задается из выражения:

$$\frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k''} \quad (1)$$

где  $k''$  – дисперсия групповой скорости в фотонно-кристаллической структуре,  $a_0$  – скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $T$  – длительность импульса, входящего в дисперсионный элемент.

Кроме того, глубина первых отверстий, выполненных в узлах указанной периодической структуры может быть равна, быть меньше или превышать толщину слоя высокопреломляющего материала, а расстояния от центров вторых отверстий до центров ближайших к ним первых отверстий в узлах периодической структуры может отличаться от периода  $a$  указанной решетки.

Глубины вторых отверстий, выполненных в узлах указанной двумерной периодической структуры может быть меньше, равна или превышать толщину высокопреломляющего слоя, а также глубину указанных первых отверстий.

Первые и вторые отверстия согласно второму варианту реализации изобретения, выполненные в узлах двумерной

периодической структуры, имеют форму круговых цилиндров.

Кроме того, указанные вторые отверстия формируют один столбец в указанной двумерной периодической структуре, по которому осуществляется волноводное распространение импульса с фазовой модуляцией в одномодовом режиме.

Изобретение поясняется на примере предпочтительных вариантов его осуществления со ссылками на сопроводительные чертежи, при этом одинаковые элементы на фигурах обозначены одними и теми же позициями. На чертежах представлено следующее:

На фиг.1- представлена схема устройства сжатия импульсов с дисперсионным элементом на основе планарной фотонно-кристаллической структурой с одномерной периодичностью.

На фиг.2 -представлена структура дисперсионного элемента на основе планарной фотонно-кристаллической структурой с одномерной периодичностью согласно первому варианту реализации изобретения.

На фиг.2а -представлен общий вид структуры дисперсионного элемента согласно фиг.2, на фиг.2б-вид вертикального сечения дисперсионного элемента согласно фиг.2

На фиг.3А и 3Б-представлены графики, полученные в результате моделирования фотонных зон в планарной фотонно-кристаллической структуре с одномерной периодичностью (первый пример), где А- иллюстрирует дисперсионную кривую одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТЕ-поляризации, Б-спектральная зависимость дисперсии групповой скорости ( $k''_{рс}$ ) для ТЕ-поляризации.

На фиг. 4А и 4Б-представлены графики, полученные в

результате моделирования фотонных зон в планарной фотонно-кристаллической структуре с одномерной периодичностью (второй пример), где А-иллюстрирует дисперсионную кривую одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТЕ-поляризации, Б-спектральная зависимость дисперсии групповой скорости ( $k''_{рс}$ ) для ТЕ-поляризации.

На фиг. 5А и 5Б-представлены графики, полученные в результате моделирования фотонных зон планарной фотонно-кристаллической структуре с одномерной периодичностью (третий пример), где А-иллюстрирует дисперсионную кривую одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТМ-поляризации, Б-спектральная зависимость дисперсии групповой скорости ( $k''_{рс}$ ) для ТМ-поляризации.

На фиг. 6А и 6Б-представлены графики, полученные в результате моделирования фотонных зон в планарной фотонно-кристаллической структуре с одномерной периодичностью (четвертый пример), где А-иллюстрирует дисперсионную кривую одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТЕ-поляризации, Б-спектральная зависимость дисперсии групповой скорости ( $k''_{рс}$ ) для ТЕ-поляризации.

На фиг. 7А и 7Б-представлены графики, полученные в результате моделирования фотонных зон в планарной фотонно-кристаллической структуре с одномерной периодичностью (пятый пример), где А-иллюстрирует дисперсионную кривую одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТМ-поляризации, Б-спектральная зависимость дисперсии групповой скорости ( $k''_{рс}$ ) для



ТМ-поляризации.

На фиг. 8-представлена структура дисперсионного элемента на основе планарной фотонно-кристаллической структуры с двумерной периодичностью согласно второму варианту реализации изобретения.

На фиг.9А и 9Б - представлены дисперсионные кривые (зависимости частоты света от волнового вектора) волноводных мод, локализованных на вторых отверстиях, полученные в результате моделирования фотонных зон с ТМ-поляризацией в планарной фотонно-кристаллической структуре с двумерной периодичностью, где А- иллюстрирует моду с отрицательной дисперсией, а Б- моду с положительной дисперсией.

На фиг. 10А и 10Б - представлены дисперсионные кривые (зависимости частоты света от волнового вектора) волноводных мод, локализованных на вторых отверстиях, полученные в результате моделирования фотонных зон с ТМ-поляризацией в планарной фотонно-кристаллической структуре с двумерной периодичностью, где А- иллюстрирует моду с положительной дисперсией, а Б- моду с отрицательной дисперсией.

На фиг. 11А и 11Б - представлены дисперсионные кривые (зависимости частоты света от волнового вектора) волноводных мод, локализованных на вторых отверстиях, полученные в результате моделирования фотонных зон с ТМ-поляризацией в планарной фотонно-кристаллической структуре с двумерной периодичностью, где А- иллюстрирует моду с положительной дисперсией, а Б- моду с отрицательной дисперсией.

На фиг.1 представлено устройство для сжатия импульсов, как

пример устройства, в котором используется дисперсионный элемент в соответствии с первым вариантом реализации изобретения. При этом указанное устройство состоит из нелинейного элемента поз.1, в виде отрезка нелинейного оптического волокна, создающего фазовую модуляцию входного импульса, и переходного элемента поз.2, выполненного в виде дифракционной решетки, осуществляющего ввод импульса с фазовой модуляцией, вышедшего из нелинейного элемента поз.1 в высокопреломляющий слой дисперсионного элемента поз.3 и элемента вывода поз.4, выполненного в виде дифракционной решетки и осуществляющего вывод импульса из высокопреломляющего слоя дисперсионного элемента поз.3.

Первый вариант реализации изобретения представлен на фиг. 2, 2а, 2б, на котором представлен дисперсионный элемент, в виде планарной фотонно-кристаллической структуры см. фиг. 2, 2а, 2б, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в плоскопараллельном слое высокопреломляющего материала с предварительно заданной толщиной и показателем преломления  $n_2$ , нанесенном на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ , причем периодическая структура представляет собой множество параллельных канавок см. фиг. 2, выполненных в указанном высокопреломляющем слое на равных расстояниях друг от друга, при этом направление распространения импульса в дисперсионном элементе осуществляется перпендикулярно указанным канавкам, а длина дисперсионного элемента  $L$ , обеспечивающая максимальное сжатие импульса задается в соответствии с теорией,

изложенной в (B.Saleh,M.Teich "Phundamentals of Photonics", John Wiley&Sons,Inc.,1991,Chapter 5,p.188) задается из выражения:

$$\frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k''} \quad (1)$$

где  $k''$  -дисперсия групповой скорости в фотонно-кристаллической структуре, рассчитанная по формуле:

$$k'' = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}, \text{ где } k\text{-волновой вектор, } \omega\text{-частота света, при этом}$$

дисперсионная кривая  $k(\omega)$ , смоделирована по программе «MIT Photonic Bands»,  $a_0$  - скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $T$ -длительность импульса, входящего в дисперсионный элемент.

На фиг.3-7 представлены графики, иллюстрирующие результаты математического моделирования сжатия оптического импульса в дисперсионном элементе согласно первому варианту реализации изобретения.

На фиг. 8 представлен второй вариант реализации изобретения, в котором раскрывается дисперсионный элемент в виде планарной фотонно-кристаллической структуры с двумерной периодичностью. Указанная структура сформирована в плоскопараллельном слое высокопреломляющего материала с предварительно заданной толщиной и показателем преломления  $n_2$ , нанесенном на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ , указанная структура представляет собой двумерную периодическую решетку с предварительно заданным периодом  $a$ , в узлах которой выполнены первые отверстия предварительно заданных размеров см. поз.5,

которые равны между собой, при этом указанные первые отверстия образуют столбцы, и вторые отверстия предварительно заданных размеров см. поз.6, отличные от размеров указанных первых отверстий, образующие предварительно заданное количество соседних столбцов, при этом указанные вторые отверстия равны между собой.

На фиг. 9-11 представлены графики, полученные в результате моделирования сжатия оптического импульса в дисперсионном элементе согласно второму варианту реализации изобретения.

Функционирование дисперсионного элемента согласно первому варианту реализации см. фиг. 2,2а,2б описано на примере устройства сжатия импульсов согласно фиг. 1. Импульс с фазовой модуляцией, сформированный в нелинейном элементе поз.1, в виде отрезка нелинейного оптического волокна, попадает в переходный элемент поз.2, выполненный в виде дифракционной решетки, осуществляющий ввод импульса с фазовой модуляцией, вышедшего из нелинейного элемента поз.1 в высокопреломляющий слой дисперсионного элемента поз.3 согласно первому варианту реализации изобретения и являющийся объектом настоящего изобретения, в котором осуществляется распространение импульса перпендикулярно канавкам одномерной планарной фотонно-кристаллической структуры. Вследствие большой дисперсии групповой скорости в указанном дисперсионном элементе см. фиг. 3-7 фазовая модуляция преобразуется в амплитудную, что приводит к значительному сокращению длительности импульса. Далее полученный импульс попадает в элемент вывода поз.4 согласно фиг.1, выполненный в виде дифракционной решетки и

осуществляющего вывод импульса из высокопреломляющего слоя дисперсионного элемента поз.3.

Указанная планарная фотонно-кристаллическая структура характеризуется следующими параметрами: показатель преломления подложки ( $n_1$ ), показатель преломления высокопреломляющего слоя ( $n_2$ ), показатель преломления защитного слоя ( $n_3$ ), при отсутствии защитного слоя  $n_3 = 1$ , при этом следует отметить наличие защитного слоя снижает потери на рассеяние и может улучшить механическую прочность, толщина высокопреломляющего слоя ( $H$ ), глубина канавок ( $h$ ), ширина канавок ( $w$ ), период структуры, т.е. расстояние между серединами соседних канавок ( $a$ ) – см. фиг 2а, 2б, длина дисперсионного элемента в направлении, перпендикулярном канавкам ( $L$ ). Указанные параметры, были определены методом математического моделирования по программе «MIT Photonic bands» [<http://ab-initio.mit.edu/mpb>] из условия обеспечения волноводного распространения импульса в одномодовом режиме, а также высокой дисперсии групповой скорости. Указанная программа основана на методе разложения по плоским волнам и позволяет проводить численные эксперименты по определению дисперсионных кривых волноводных мод в планарных фотонно-кристаллических структурах. Указанные эксперименты были проведены для мод, распространяющихся перпендикулярно канавкам планарной фотонно-кристаллической структуры с одномерной периодичностью в широком интервале изменения параметров  $n_1, n_2, n_3, H, a, r_0, h_0, w, a$ . Анализ этих численных экспериментов показал возможность обеспечения

одномодового режима волноводного распространения света заданной поляризации и длины волны в заданном рабочем диапазоне ( $\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}$ ) оценивается с помощью представленных графиков дисперсионных кривых по формуле:  $\lambda_{\max}=a/\omega_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}=a/\omega_{\min}$ , где  $\omega_{\max}$  и  $\omega_{\min}$  максимальное и минимальное значения безразмерной частоты света ( $a/(\text{длина волны})$ ) соответственно на графиках дисперсионных кривых, а также требуемого знака дисперсии групповой скорости. Результаты полученных экспериментов изображены на фиг. 3-7.

На фиг. 3 представлены расчеты спектральных характеристик планарной фотонно-кристаллической структуры, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в виде параллельных канавок в слое высокопреломляющего материала со следующими параметрами:  $a=491.7\text{nm}$ ,  $H=h$ ,  $w=0.5a$ ,  $n_1=n_3=1.5$ ,  $n_2=2.3$ , где для варианта 3А представлена дисперсионная кривая одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТЕ-поляризации, а для варианта 3Б представлена спектральная зависимость дисперсии групповой скорости  $k''_{\text{гс}}$  для ТЕ-поляризации.

На фиг.4 представлены расчеты спектральных характеристик планарной фотонно-кристаллической структуры, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в виде параллельных канавок в слое высокопреломляющего материала со следующими параметрами:  $a=514.4\text{nm}$ ,  $H=1.0a$ ,  $h=0.8a$ ,  $w=1.0a$ ,  $n_1=n_3=1.5$ ,  $n_2=2.3$ , где для варианта 4А представлена дисперсионная кривая одномодового режима с отрицательной

дисперсией для ТЕ-поляризации, а для варианта 4Б представлена спектральная зависимость дисперсии групповой скорости  $k''_{рс}$  для ТЕ поляризации.

На фиг.5 представлены расчеты спектральных характеристик планарной фотонно-кристаллической структуры, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в виде параллельных канавок в слое высокопреломляющего материала со следующими параметрами:  $a = 488.3\text{nm}$ ,  $H=h$ ,  $w=0.5a$ ,  $n_1=n_3=1.5$ ,  $n_2=2.3$ , где для варианта 5А представлена дисперсионная кривая одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТМ-поляризации, а для варианта 5Б представлена спектральная зависимость дисперсии групповой скорости  $k''_{рс}$  для ТМ-поляризации.

На фиг.6 представлены расчеты спектральных характеристик планарной фотонно-кристаллической структуры, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в виде параллельных канавок в слое высокопреломляющего материала со следующими параметрами:  $a = 478.3\text{nm}$ ,  $H=h=1.0a$ ,  $w=0.5a$ ,  $n_1=n_3=1.5$ ,  $n_2=2.3$ , где для варианта 6А представлена дисперсионная кривая одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТЕ-поляризации, а для варианта 6Б представлена спектральная зависимость дисперсии групповой скорости  $k''_{рс}$  для ТЕ-поляризации.

На фиг.7 представлены расчеты спектральных характеристик планарной фотонно-кристаллической структуры, выполненной в виде одномерной периодической структуры, сформированной в виде

параллельных канавок в слое высокопреломляющего материала со следующими параметрами:  $a = 475.4 \text{ nm}$ ,  $H=h$ ,  $w=1.0a$ ,  $n_1=n_3=1.5$ ,  $n_2=2.3$ , где для варианта 7А представлена дисперсионная кривая одномодового режима с отрицательной дисперсией для ТМ-поляризации, а для варианта 7Б представлена спектральная зависимость дисперсии групповой скорости  $k''$  для ТМ-поляризации.

Длина дисперсионного элемента вдоль направления распространения импульса определяется выражением (1) с учетом длительности, и дисперсии групповой скорости в дисперсионном элементе, рассчитанной по программе "MIT Photonic bands".

На фиг. 8 представлен второй вариант реализации изобретения, в котором раскрывается дисперсионный элемент, выполненный в виде планарной фотонно-кристаллической структуры с двумерной периодичностью. Указанная структура сформирована в плоскопараллельном слое высокопреломляющего материала с предварительно заданной толщиной и показателем преломления  $n_2$ , нанесенном на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ , указанная структура представляет собой двумерную периодическую решетку с предварительно заданным периодом  $a$ , в узлах которой выполнены первые отверстия предварительно заданных размеров см. поз.5, которые равны между собой, при этом указанные первые отверстия образуют столбцы, и вторые отверстия предварительно заданных размеров см. поз.6, отличные от размеров указанных первых отверстий, образующие предварительно заданное количество соседних столбцов, при этом указанные вторые отверстия равны между собой.



Кроме того, длина дисперсионного элемента  $L$ , обеспечивающая максимальное сжатие импульса задается в соответствии с теорией, изложенной в (B.Saleh, M.Teich "Fundamentals of Photonics", John Wiley&Sons, Inc., 1991, Chapter 5, p.188) задается из выражения:

$$\frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k''} \quad (1)$$

где  $k''$  - дисперсия групповой скорости в фотонно-кристаллической структуре, рассчитанная по формуле:

$$k'' = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}, \text{ где } k - \text{волновой вектор, } \omega - \text{частота света, при этом}$$

дисперсионная кривая  $k(\omega)$ , смоделирована по программе «MIT Photonic Bands»,  $a_0$  - скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $T$  - длительность импульса, входящего в дисперсионный элемент.

Дисперсионный элемент согласно второму варианту реализации изобретения работает следующим образом. Работа указанного устройства осуществляется на примере выполнения дисперсионного элемента с предварительно заданным одним столбцом, сформированным из вторых отверстий, согласно фиг.8. Импульс с фазовой модуляцией направляется в дисперсионный элемент согласно второму варианту реализации изобретения, где осуществляется распространение импульса с фазовой модуляцией по столбцу, сформированному из вторых отверстий поз.6 см. фиг.8, указанное распространение импульса можно сравнить с распространением импульса по волноводу. Вследствие большой дисперсии групповой скорости в дисперсионном элементе согласно фиг.11 фазовая модуляция преобразуется в

амплитудную, что приводит к сокращению длительности импульса.

Структура дисперсионного элемента согласно второму варианту реализации изобретения задается следующими параметрами: показатель преломления подложки ( $n_1$ ), показатель преломления высокопреломляющего слоя ( $n_2$ ), показатель преломления защитного слоя ( $n_3$ ), при отсутствии защитного слоя  $n_3 = 1$ , толщина высокопреломляющего слоя ( $H$ ), тип двумерной периодической решетки, например, решетка может быть тригональной, прямоугольной, или квадратной, период структуры, т.е. расстояние между узлами двумерной периодической решетки ( $a$ ). В указанном варианте реализации изобретения рассматривается случай, когда первые и вторые отверстия имеют форму круговых цилиндров, радиус первых отверстий ( $r_0$ ), глубина первых отверстий ( $h_0$ ), при этом глубина указанных первых отверстий может быть меньше, равна или превышать толщину высокопреломляющего слоя. При этом указанные первые отверстия должны иметь одинаковые размеры. В указанном варианте реализации рассматривает радиус вторых отверстий ( $r_w$ ), глубина вторых отверстий ( $h_w$ ), при этом глубина указанных вторых отверстий может быть меньше, равна или превышать толщину высокопреломляющего слоя, а также глубину первых отверстий. При этом указанные вторые отверстия имеют одинаковый размер. Расстояния от центров вторых отверстий до центров ближайших первых отверстий может отличаться от периода структуры  $a$ .

Параметры  $n_1, n_2, n_3, H, a, r_0, h_0, r_w, h_w$  задаются таким образом, чтобы обеспечить одномодовый режим распространения импульса

заданной поляризации и длины волны в заданном (рабочем) спектральном диапазоне вдоль вторых отверстий, а также большую абсолютную величину и требуемый знак дисперсии групповой скорости. А именно, отрицательное значение дисперсии групповой скорости для положительного значения скорости изменения фазы импульса, вышедшего из нелинейного элемента, и положительное значение дисперсии групповой скорости для отрицательного значения скорости изменения фазы импульса, вышедшего из нелинейного элемента. Согласно формуле (1) абсолютная величина дисперсии групповой скорости должна быть достаточной для обеспечения максимального сжатия импульса на предварительно заданной длине дисперсионного элемента.

Количественные значения параметров указанных выше удовлетворяющих указанным условиям определяются с помощью математического моделирования распространения света в дисперсионном элементе согласно второму варианту реализации изобретения. Моделирование осуществляется с помощью компьютерной программы «MIT Photonic Bands». Указанная программа как уже указывалось, основана на методе разложения по плоским волнам, позволяет проводить численные эксперименты по определению дисперсионных кривых волноводных мод в планарных фотонно-кристаллических структурах. Указанные эксперименты были проведены для мод, распространяющихся по вторым отверстиям фотонно-кристаллической структуры с двумерной периодичностью в широком интервале изменения параметров  $n_1, n_2, n_3, H, a, r_0, h_0, r_w, h_w$ . Анализ этих численных экспериментов показал возможность

обеспечения одномодового режима волноводного распространения света заданной поляризации и длины волны в заданном (рабочем) спектральном диапазоне, а также требуемого знака дисперсии групповой скорости. При этом свет распространяется вдоль вторых отверстий.

Результаты полученных экспериментов изображены на фиг. 9-11. Пример рассчитанных дисперсионных кривых волноводных мод во вторых отверстиях, образующий один столбец представлен на фиг. 9. В указанном примере для варианта А рассматривается мода с отрицательной дисперсией, для варианта Б рассматривается мода с положительной дисперсией. Параметры структуры задаются : тип двумерной решетки - тригональная,  $n_1 = 1, n_2 = 3.4, n_3 = 1, 0, H = h_0 = h_w = 0.5a, r_0/a = 0.4, r_w/a = 0.3$ , т.е. в указанном примере вторые отверстия имеют меньший диаметр, чем первые отверстия. В указанном примере обеспечивается одномодовый режим распространения, при этом свет локализован на столбце, сформированном из вторых отверстий двумерной фотонно-кристаллической структуры.

Для частного случая, когда в двумерной планарной фотонно-кристаллической структуре пропущен один столбец вторых отверстий (математически этот случай соответствует  $r_w = 0$ , где  $r_w$  - радиус вторых отверстий) и импульс распространяется вдоль указанного пропущенного столбца фотонно-кристаллической структуры, представлены дисперсионные кривые (зависимости частоты света от волнового вектора) волноводных мод, см. фиг. 10А и 10Б, локализованных на вторых отверстиях, полученные в

результате моделирования фотонных зон с ТМ-поляризацией в планарной фотонно-кристаллической структуре с двумерной периодичностью, где А- иллюстрирует моду с положительной дисперсией, а Б- моду с отрицательной дисперсией. Параметры структуры задаются : тип двумерной решетки -тригональная,  $n_1 = 1.0, n_2 = 3.4, n_3 = 1, 0, H = h_0 = h_w = 0.5a, r_0/a = 0.4, r_w = 0$ .

Указанный выбор параметров обеспечивает одномодовый режим распространения, при этом свет локализован на вторых отверстиях, образующих столбец двумерной фотонно-кристаллической структуры.

Пример рассчитанных кривых дисперсии групповой скорости волноводных мод во вторых отверстиях, образующий один столбец представлен на фиг. 11 (А,Б). В указанном примере для варианта А рассматривается мода с положительной дисперсией, для варианта Б рассматривается мода с отрицательной дисперсией. Параметры структуры задаются : тип двумерной решетки -тригональная,  $n_1 = 1.0, n_2 = 3.4, n_3 = 1, 0, H = h_0 = h_w = 0.5a, r_0/a = 0.4, r_w/a = 0.3$ , т.е. в указанном примере вторые отверстия имеют меньший диаметр, чем первые отверстия. В указанном примере обеспечивается одномодовый режим распространения, при этом свет локализован на столбце, сформированном из вторых отверстий двумерной фотонно-кристаллической структуры.

Заявленные варианты дисперсионного элемента на основе планарной фотонно-кристаллической структуры с одномерной или двумерной периодичностью естественным образом интегрируются в оптическое устройство на одном чипе с использованием традиционных

методов связи между элементами схемы, а также при его изготовлении можно использовать хорошо разработанные методы нано-литографии. Это позволяет создать дисперсионный элемент большей длины по сравнению с известными из уровня техники конструкциями в виде многослойной структуры и при этом получить большую компрессию импульса. Использование «волноводного эффекта» в заявленном устройстве позволяет сконцентрировать излучение в направлении распространения и избежать значительных дифракционных потерь. Устройство согласно изобретению может успешно использоваться в твердотельных короткоимпульсных лазерных системах.

## Формула изобретения

1. Дисперсионный элемент устройства для сжатия лазерных импульсов, осуществляющий компрессию импульса с фазовой модуляцией, выполненный основе планарной фотонно-кристаллической структуры в виде одномерной периодической структуры, сформированной в слое предварительно заданной толщины высокопреломляющего материала с показателем преломления  $n_2$ , который нанесен на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ ; причем периодическая структура представляет собой множество параллельных канавок с предварительно заданной шириной и глубиной, выполненных в указанном высокопреломляющем слое на равных расстояниях друг от друга, при этом направление распространения импульса в дисперсионном элементе осуществляется перпендикулярно указанным канавкам, а длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией.

2. Дисперсионный элемент по п. 1, отличающийся тем, что указанная периодическая структуры покрыта защитным слоем, выполненным из материала с предварительно заданным показателем преломления  $n_3$  и обеспечивающим механическую прочность и снижение потерь на рассеяние, при этом  $n_3 < n_2$  на величину, обеспечивающую волноводное распространение импульса в одномодовом режиме.

3. Дисперсионный элемент по п. 1, отличающийся тем, что длина дисперсионного элемента  $L$  задается из выражения:

$$L = \frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k''}$$

где  $\alpha_0$  – скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $k''$  – дисперсия групповой скорости в одномерной планарной фотонно-кристаллической структуре,  $T$  – длительность входного импульса.

4. Дисперсионный элемент, устройства для сжатия лазерных импульсов, осуществляющий компрессию импульса с фазовой модуляцией, выполненный на основе планарной фотонно-кристаллической структуры в виде двумерной периодической структуры с предварительно заданным периодом  $a$ , сформированной в слое предварительно заданной толщины высокопреломляющего материала с показателем преломления  $n_2$ , который нанесен на подложку с показателем преломления  $n_1$ , при этом  $n_2 > n_1$ , причем в узлах указанной двумерной периодической структуры выполнены первые отверстия предварительно заданных равных размеров, образующие столбцы, и вторые отверстия предварительно заданных равных размеров, отличные от размеров указанных первых отверстий, образующие предварительно заданное количество соседних столбцов, при этом размеры указанных первых и вторых отверстий и указанные показатели преломления задаются из условия обеспечения волноводного распространения в одномодовом режиме импульса с фазовой модуляцией вдоль столбцов указанных вторых отверстий указанной структуры, причем длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией.

5. Дисперсионный элемент по п. 4, отличающийся тем, что



указанная двумерная периодическая структура выбирается из: тригональной, прямоугольной или квадратной периодических решеток.

6. Дисперсионный элемент по п. 4, отличающийся тем, что указанная двумерная периодическая структура покрыта защитным слоем, выполненным из материала с предварительно заданным показателем преломления  $n_3$ , и обеспечивающим механическую прочность и снижение потерь на рассеяние.

7. Дисперсионный элемент по п. 4, отличающийся тем, что длина дисперсионного элемента  $L$  задается из выражения:

$$L = \frac{(\alpha_0 T^2)^2}{[1 + (\alpha_0 T^2)] \alpha_0 k''}$$

где  $a_0$  - скорость измерения фазы импульса с фазовой модуляцией,  $k''$  - дисперсия групповой скорости в одномерном планарной фотонно-кристаллической структуре,  $T$  - длительность входного импульса.

8. Дисперсионный элемент по п. 4, отличающийся тем, что глубина первых отверстий, выполненных в узлах указанной периодической структуры может быть равна, быть меньше или превышать толщину слоя высокопреломляющего материала.

9. Дисперсионный элемент по одному из пунктов 4, 8 отличающийся тем, что глубина вторых отверстий, выполненных в узлах указанной периодической структуры может быть меньше, равна или превышать толщину высокопреломляющего слоя, а также глубину указанных первых отверстий.

10. Дисперсионный элемент по п. 4, отличающийся тем, что расстояния от центров вторых отверстий до центров ближайших к ним

первых отверстий в узлах периодической структуры может отличаться от периода  $a$  указанной структуры.

11. Дисперсионный элемент по п.4, отличающийся тем, что первые и вторые отверстия, выполненные в узлах двумерной периодической структуры имеют форму круговых цилиндров.

12. Дисперсионный элемент по п.4, отличающийся тем, что указанные вторые отверстия формируют один столбец в указанной двумерной периодической структуре, по которому обеспечивается волноводное распространение импульса с фазовой модуляцией в одномодовом режиме.

## Реферат

Изобретение относится к области лазерной техники и волоконной оптики. Заявлен дисперсионный элемент на основе планарной фотонно-кристаллической структуры, сформированной в слое высокопреломляющего материала, при этом указанная структура согласно первому варианту реализации изобретения представляет множество параллельных канавок с предварительной заданной шириной и глубиной, при этом направление распространения импульса осуществляется перпендикулярно указанным канавкам, а длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией. Периодическая структура согласно второму варианту реализации изобретения выполнена в виде двумерной периодической структуры согласно фиг.8, в узлах которой выполнены первые отверстия поз.5, которые равны между собой и образуют столбцы и вторые отверстия поз.6, которые равны между собой и образуют предварительно заданное количество соседних столбцов, при этом размеры первых отверстий отличаются от размеров вторых отверстий, причем размеры указанных первых и вторых отверстий и показатели преломления высокопреломляющего материала и подложки задаются из условия обеспечения волноводного распространения в одномодовом режиме импульса с фазовой модуляцией вдоль столбцов вторых отверстий указанной структуры, причем во втором варианте реализации длина дисперсионного элемента задается из условия максимального сжатия импульса с фазовой модуляцией.